



# ***“Calidad de la Energía en el contexto de la integración de las FERNC”***

**IITREE-LAT**  
Instituto de Investigaciones  
Tecnológicas para Redes y Equipos  
Eléctricos / Laboratorio de Alta Tensión  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE LA PLATA**

**Argentina**

**Expositor:** Prof. Mag. Ing. Gustavo Barbera

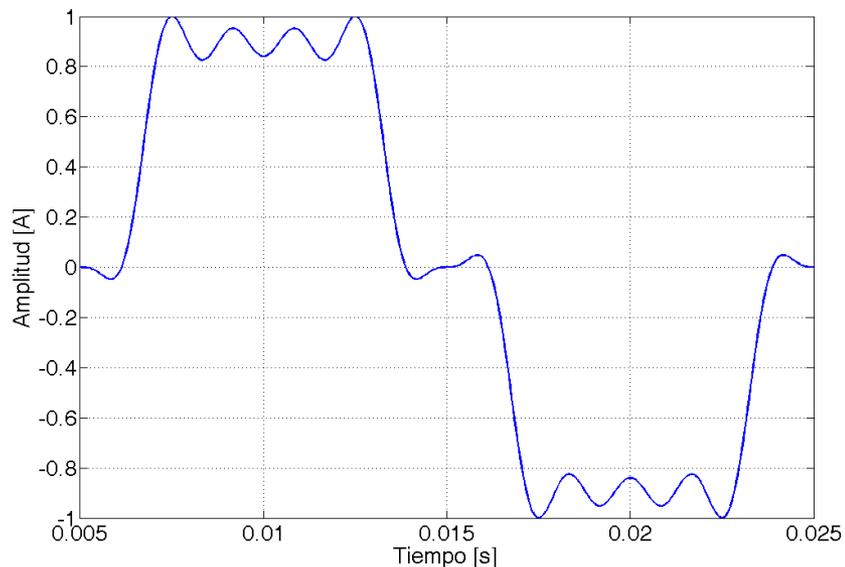
*Cartagena, Colombia, 5 y 6 septiembre de 2019*

- ❑ En la actualidad, se evidencia un crecimiento sostenido de la inserción de FERNC (**F**uentes de **E**nergía **R**enovables **N**o **C**onvencionales) en los sistemas eléctricos.
- ❑ Entre dichas fuentes de energía se encuentran la eólica y la solar fotovoltaica.
- ❑ Naturalmente, esto representa un marcado avance en la utilización de recursos renovables dentro de las matrices energéticas de los distintos países.
- ❑ Por otro lado, debido a características inherentes a su propio funcionamiento, estos generadores emiten perturbaciones hacia la red a la que se encuentran conectados. Si esto no controla debidamente, puede afectar la Compatibilidad Electromagnética en el Punto de Acoplamiento Común (PAC).
- ❑ Los aerogeneradores conectados en forma directa a la red de suministro – hoy casi en desuso – producen variaciones en la tensión del PAC, las que se traducen en “flicker”.
- ❑ Este inconveniente puede ser mitigado por medio de la incorporación de convertidores CA-CC y CC-CA, dando origen a las configuraciones de aerogeneradores DFIG (“Doubly-Fed Induction Generator”) y FC (“Full Converter”).
- ❑ Sin embargo, los convertidores generan otra fuente de perturbaciones, las armónicas.
- ❑ Asimismo, cuando se conectan generadores fotovoltaicos al sistema – debido al Inversor que éstos poseen – también está presente la emisión de armónicas.
- ❑ Consecuentemente, en sendos casos – generadores eólicos y fotovoltaicos – cuando su potencia se encuentra por encima de determinado valor, es necesario llevar a cabo un riguroso análisis del impacto que su inserción tendrá en términos de Calidad de Energía.

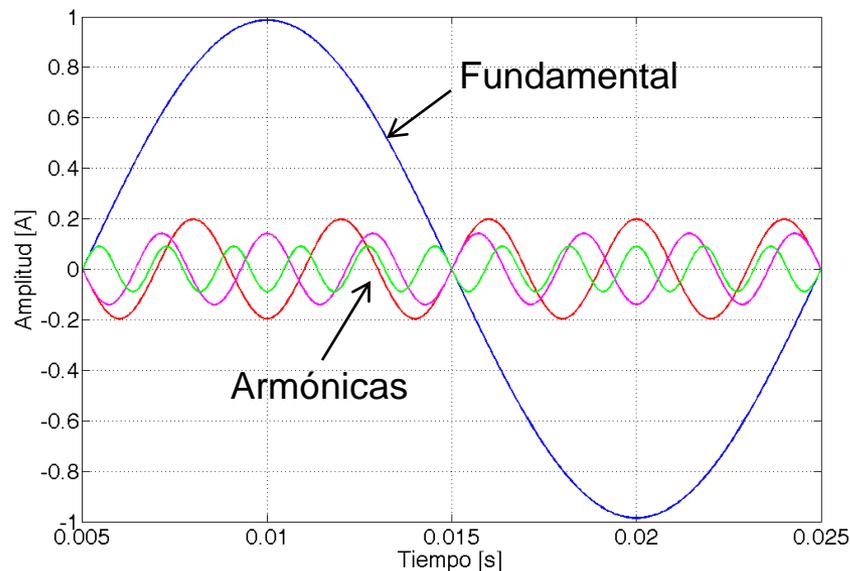
**IEC 61000-2-1**: *Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 2: Environment. Section 1: Description of Environment - Electromagnetic Environment for Low Frequency Conducted Disturbances and Signaling in Public Power Supply Systems).*

Se define a una armónica como una señal cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema (50 Hz para Argentina).

Corriente distorsionada



Armónicas de corriente



Las **fluctuaciones de tensión** son variaciones de la magnitud de la tensión de frecuencia fundamental, originadas principalmente por variaciones de la carga.

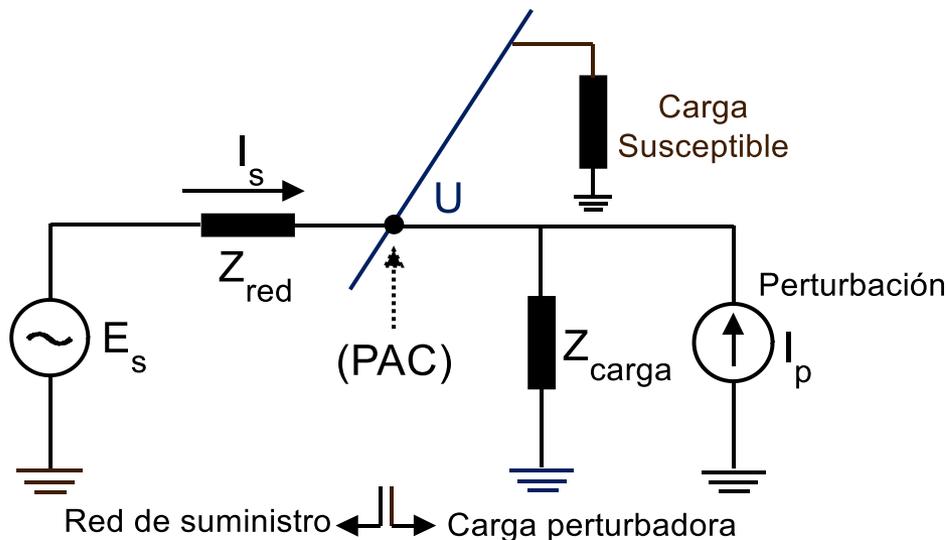


**Definición de flicker.** Sensación visual experimentada por un observador sometido a variaciones de la intensidad de la iluminación.

La persistencia de las variaciones en la iluminación provoca molestias en el observador. Este fenómeno **subjetivo** está relacionado con la sensibilidad y la reacción de cada persona y debe ser estudiado sobre bases estadísticas.

El *flicker* tiene origen en las variaciones (modulación de amplitud) de la componente de tensión fundamental (50 Hz) por frecuencias que se encuentran típicamente en el rango de 0,1 a 30 Hz.

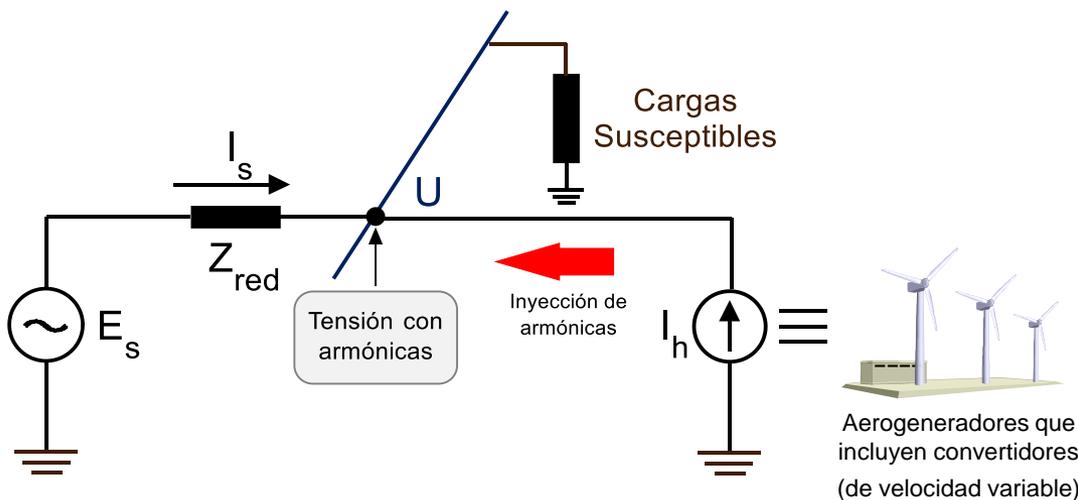
Abordaje “tradicional”  
consistente en  
“cargas  
perturbadoras”



**PAC: Punto de Acoplamiento Común.**

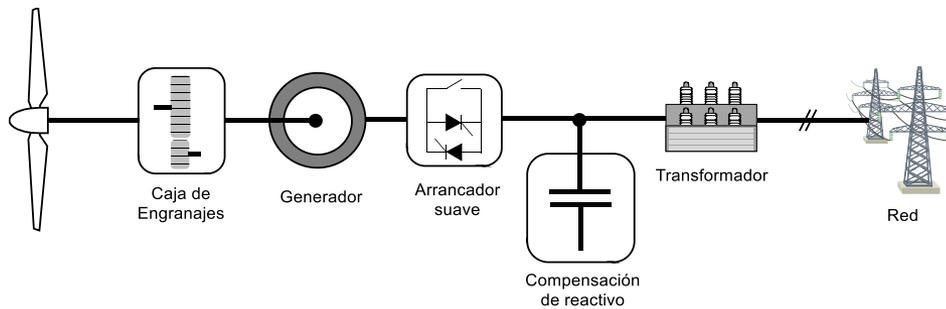
ó **PCC: Point of Common Coupling.**

Cambio de paradigma,  
generadores que  
pueden emitir  
perturbaciones



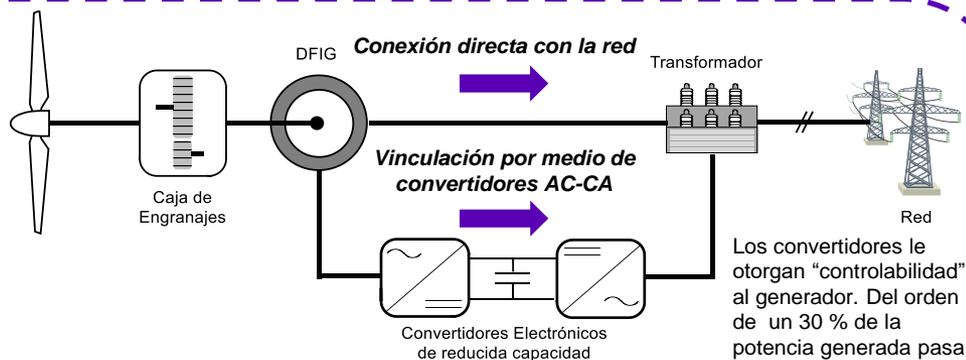
## Posible causante de flicker

**Velocidad Fija  
Vinculación "directa"  
(Tipo 1)**

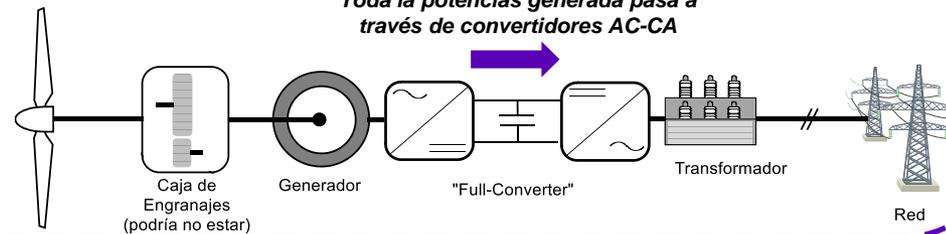


## Posibles causantes de armónicas

**Velocidad Variable  
"DFIG"  
(Doubly-Fed Induction Generator)  
(Tipo 3)**



**Velocidad Variable  
"FC (Full-Converter)"  
(Tipo 4)**



En el caso del Uruguay, se cuenta con 70 % con tecnología DFIG y 29 % con FC

## Ventajas

## Desventajas

## Velocidad Fija

- Simples, robustos y confiables.
- Bajo costo y escaso mantenimiento.

- Reducida eficiencia de conversión.
- Elevado stress mecánico.
- **Produce fluctuaciones de tensión en la red (*flicker*). Por variaciones en el viento y “efecto sombra”.**

## Velocidad Variable

- Elevada eficiencia de conversión.
- Reducido stress mecánico.
- **No produce fluctuaciones de tensión.**

- Costos y pérdidas adicionales, debidas a los convertidores.
- Sistema de control más complejo.
- **Emisión de armónicas hacia la red.**

**Norma IEC 61400-21:** “Medida y evaluación de las características de la calidad de suministro de las turbinas eólicas conectadas a la red”.

- ❑ La Norma aborda tanto la emisión de armónicas como de flicker.
- ❑ Según la propia Norma, ésta debe ser aplicada por:



- ❑ Su aplicación se considera un **modelo de primera aproximación**, puesto que da pautas de cómo “**estimar**” la emisión de perturbaciones hacia el PAC.
- ❑ Para conocer el verdadero efecto del Parque en el PAC deberían realizarse tanto simulaciones como mediciones en campo, siendo estas últimas las determinantes para una eventual habilitación técnica.
- ❑ La Norma no brinda niveles máximos de emisión. Señala que los valores resultantes de su aplicación deben compararse con los límites existentes en el país en cuestión.
- ❑ **Necesidad de contar con un marco regulatorio local consolidado.**

*- A utilizar por el fabricante del aerogenerador -*

La Norma, en primera instancia, indica cómo determinar la emisión de armónicas y de flicker **de un único aerogenerador (AG)**:

- Para ello da pautas de cómo realizar el ensayo de emisión.
- Para el caso particular de armónicas, deben evaluarse el THD y las armónicas hasta la 50ª.
- Estos ensayos debe repetirse para 11 escalones de la potencia nominal (0; 10%  $P_n$ ; 20%  $P_n$ ;.....; 100%  $P_n$ ).
- De esta forma, se obtiene una matriz de 539 elementos, la cual es provista por el fabricante.

*- A utilizar por el operador del parque -*

Luego, propone un sencillo método de **estimación** de armónicas en el PAC (**Modelo A**):

- Indica que si el Parque cuenta con  $N_{wt}$  turbinas como la ensayada, la emisión será:

$$I_{h\Sigma} = \beta \sqrt[N_{wt}]{\sum_{i=1}^{N_{wt}} \left( \frac{I_{h,i}}{n_i} \right)^\beta}$$

- $n_i$ : Relación del transformador  $i$ ésima turbina.

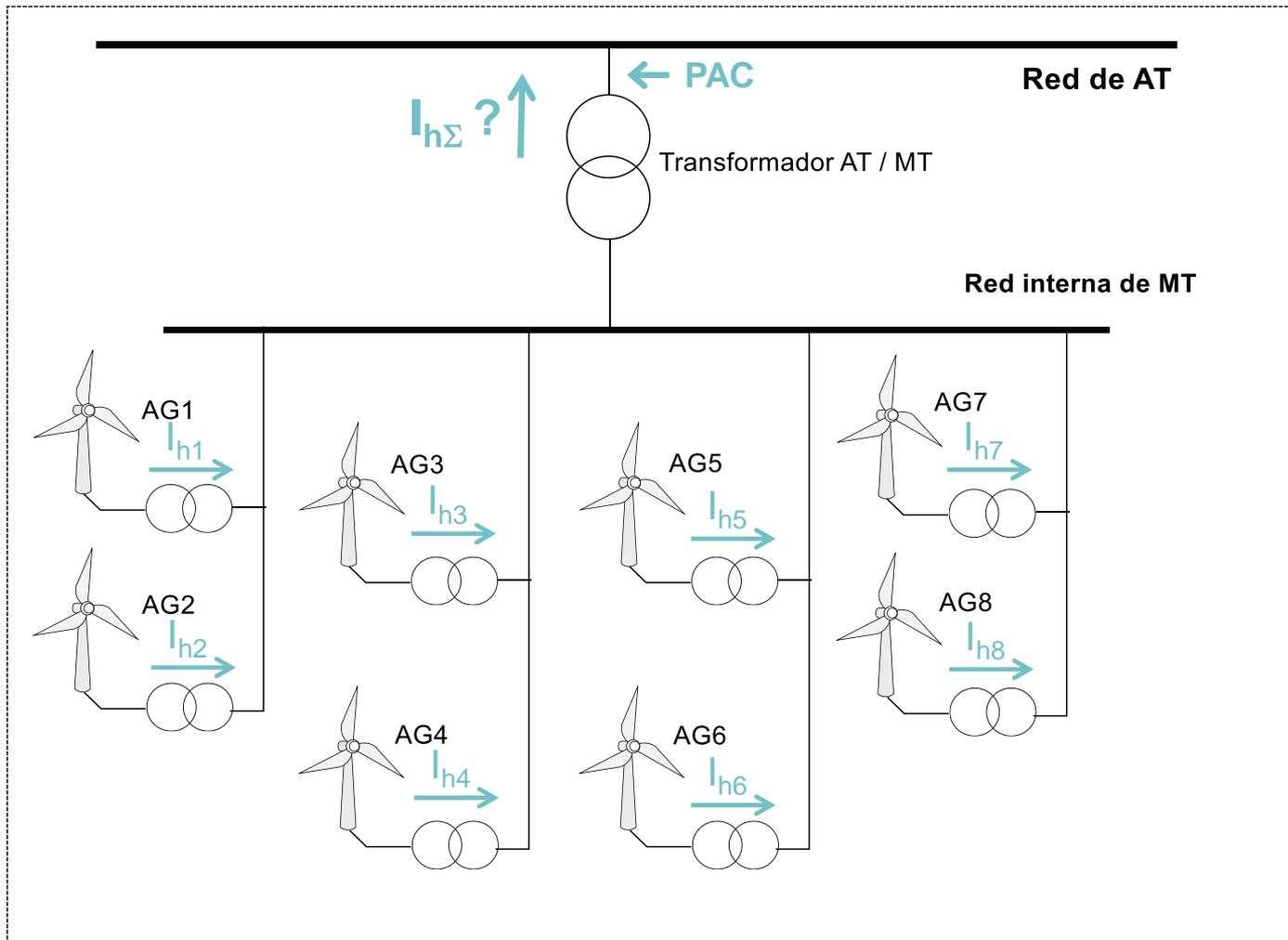
- $I_{h,i}$ : Distorsión armónica de orden  $h$  de la  $i$ ésima turbina eólica.

- $\beta$ : Exponente de la tabla. 

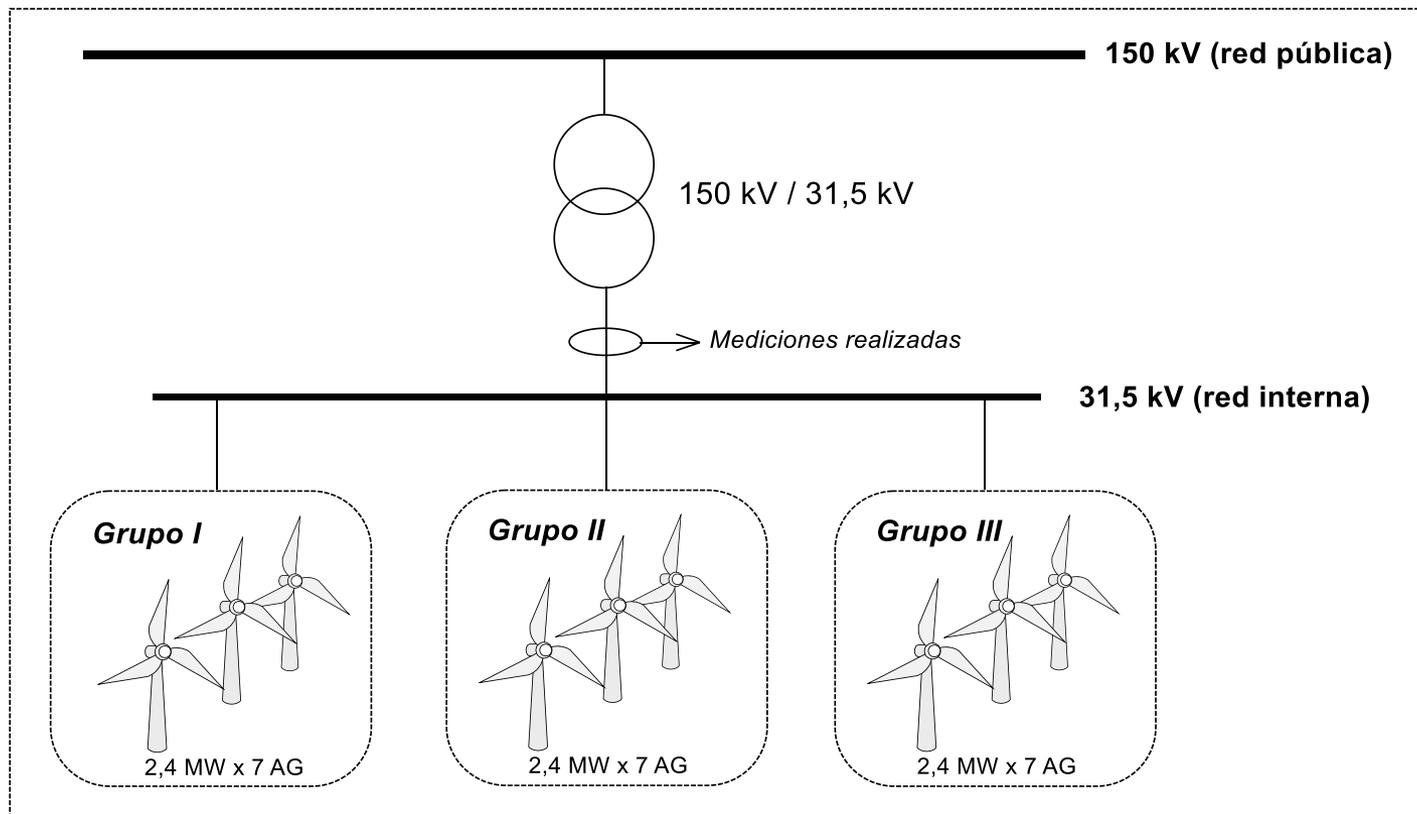
Orden del armónico	$\beta$
$h < 5$	1,0
$5 \leq h \leq 10$	1,4
$h > 10$	2

- No contempla la topología de la red interna (longitudes y secciones de los cables desde los aerogeneradores al PAC, características de los transformadores utilizados).
- Tampoco la red externa al Parque  $\Rightarrow$  Posibles resonancias.

- Se llevó a cabo un estudio con el objeto de evaluar métodos de agregación de armónicas de los AG individuales en el PAC (punto en el que la empresa transportista debe observar el impacto del Parque).
- Los resultados de las predicciones (tanto de la Norma como de las simulaciones) fueron comparados con mediciones en campo.

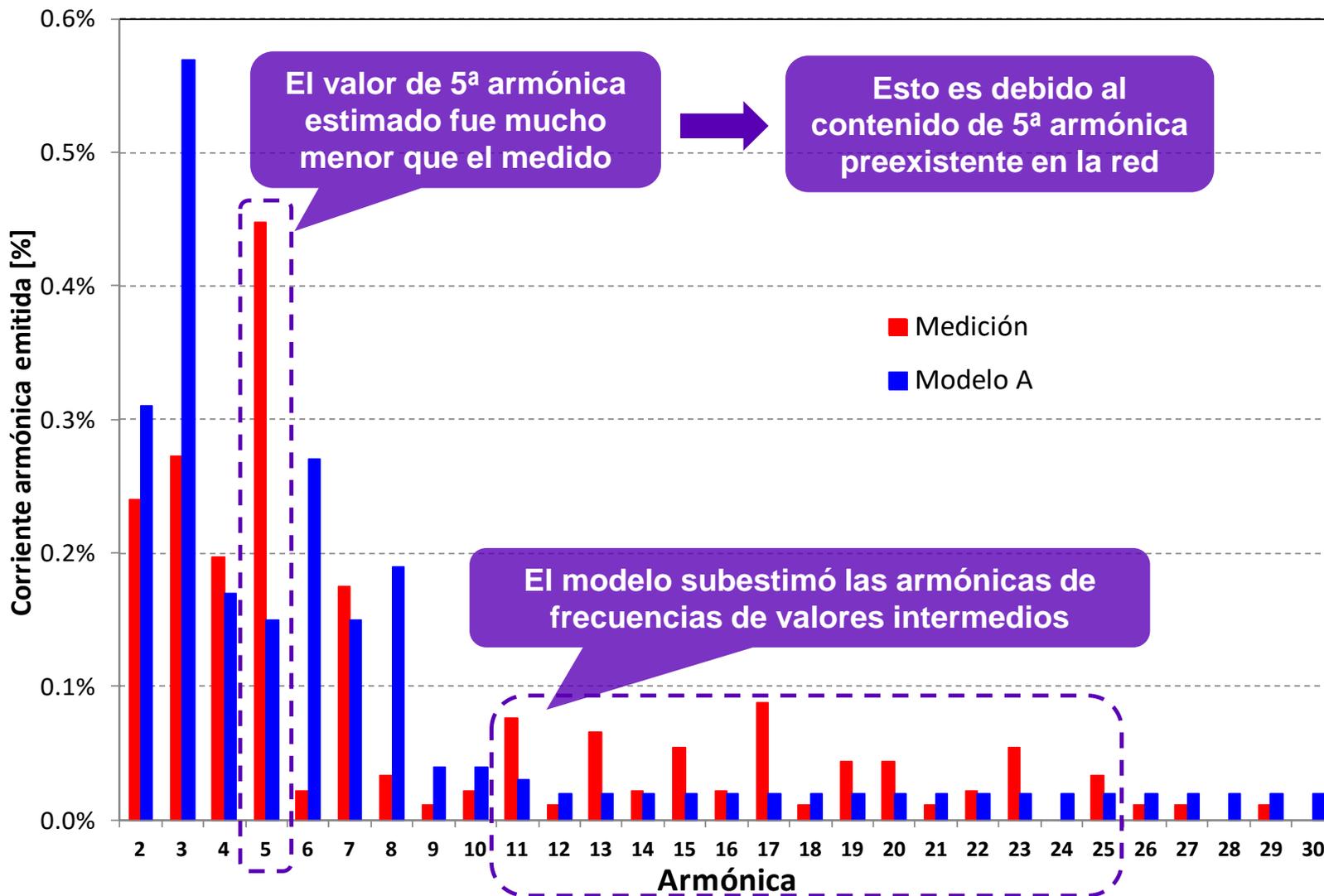


El Parque cuenta con 21 aerogeneradores **DFIG** (Tipo 3), de  $P_n = 2,4$  MW cada uno. Por lo tanto, la potencia instalada alcanza los 50 MW



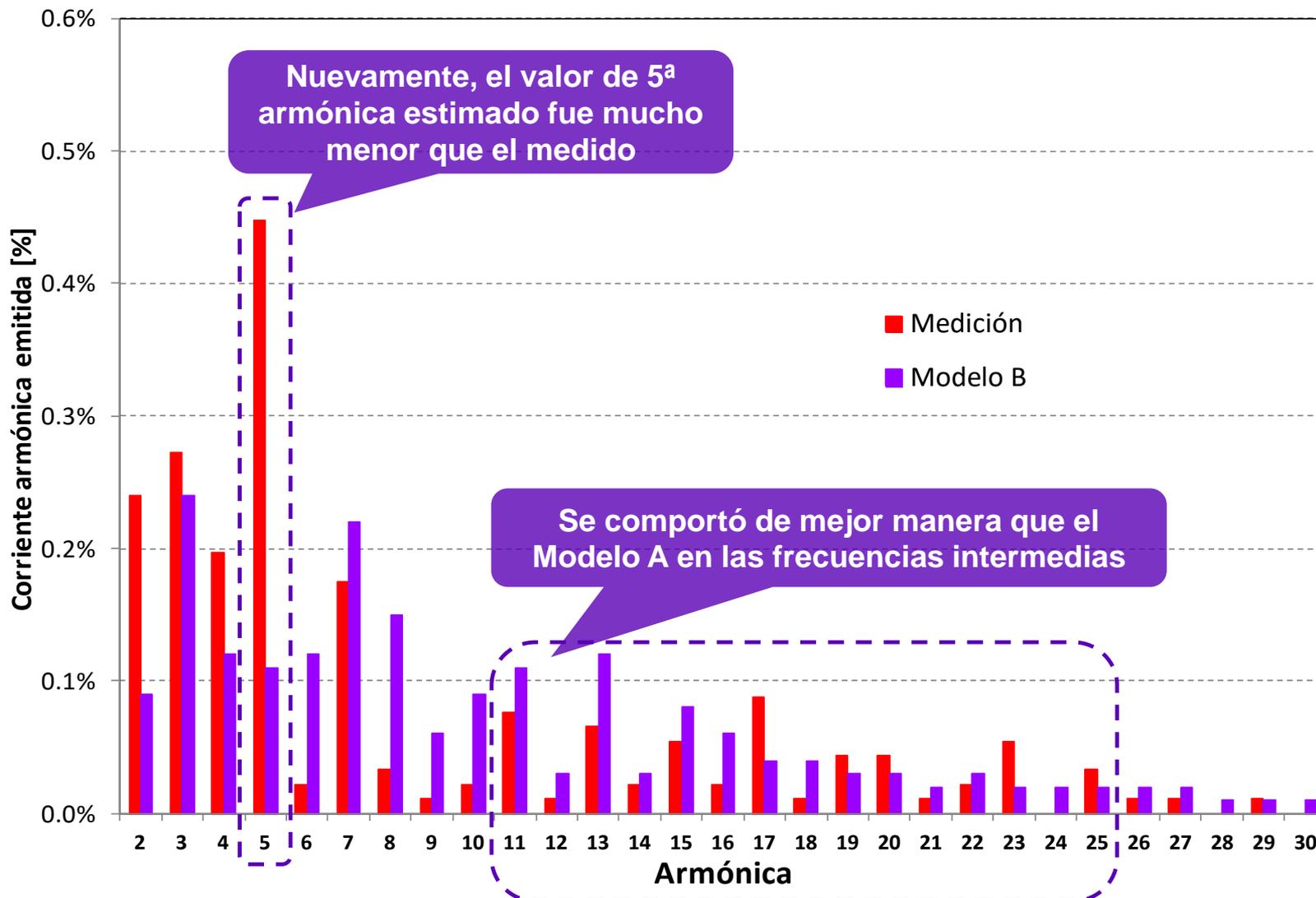
Éstos se encuentran dispuestos en tres grupos (I, II y III en el gráfico) de 7 de ellos cada uno, vinculados entre sí “en guirnalda”

Comparación entre Modelo A y Mediciones, hasta armónica 30ª

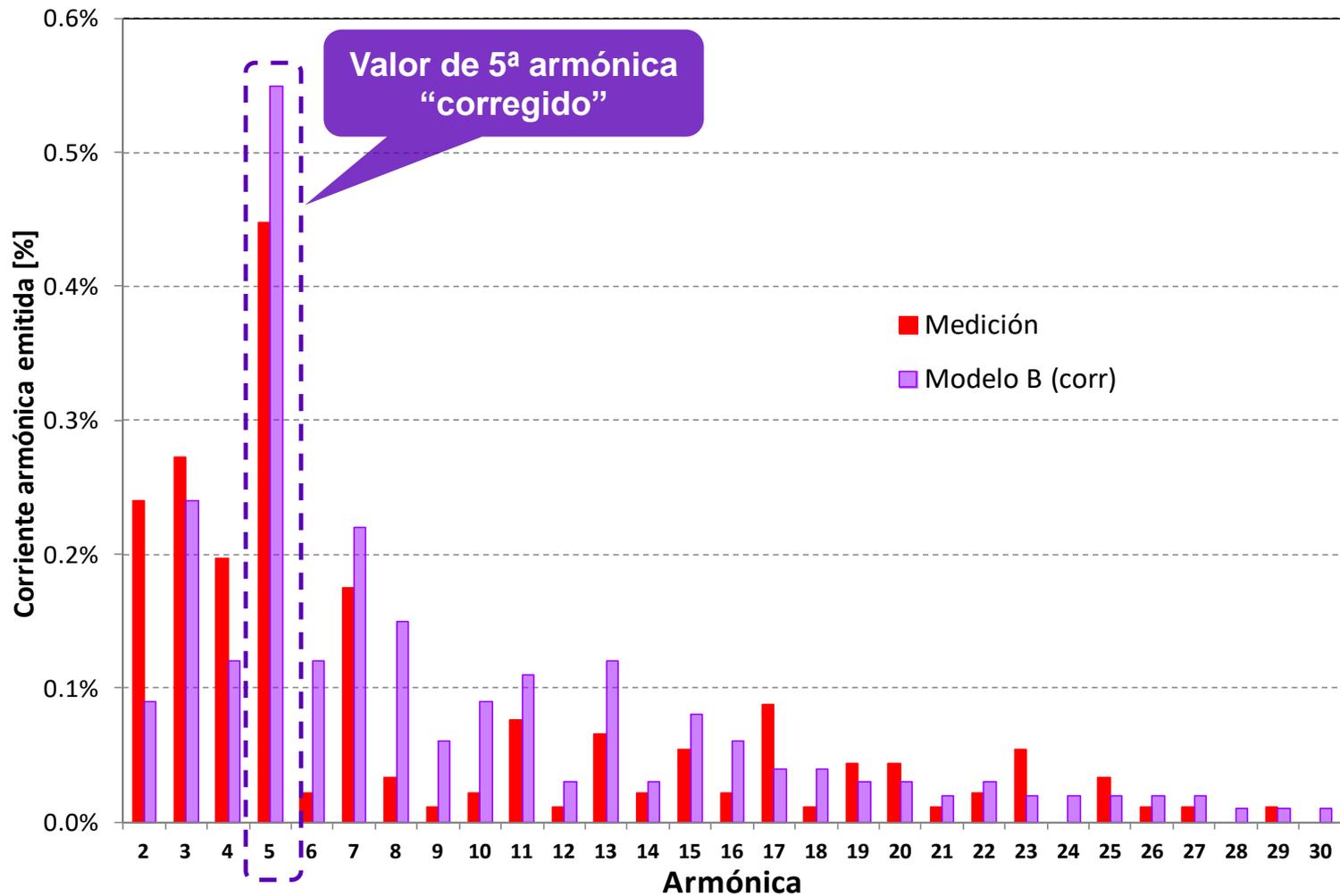


La gran diferencia con el Modelo A es que el Modelo B sí contempla el aporte de la red interna del Parque, y la externa (preexistente):

- Para llevarlo a cabo fue necesario implementar el modelo del Parque en un programa de simulación.
- En este caso particular se empleó el programa *PowerFactory* de *DlgSILENT*.
- Se modeló también la red eléctrica “aguas arriba” del punto de conexión.
- La red interna del Parque se modeló utilizando elementos definidos en la librería del programa (cables, transformadores; etc), personalizados para el caso bajo estudio.
- Este programa realiza las correcciones por frecuencia en los modelos eléctricos de los componentes.
- La librería del programa contiene aerogeneradores, a los que se les pueden ingresar los resultados de los ensayos de emisión de la Norma IEC 61400-21.
- Se cargaron los datos provistos por el fabricante de los aerogeneradores.

Comparación entre Modelo B y Mediciones, hasta armónica 30<sup>a</sup>

La 5ª armónica suele estar presente en los sistemas de AT, independientemente del aporte del Parque Eólico  $\Rightarrow$  se creó el Modelo B “corregido”, en el cual se agregó tal componente



Artículo: *“International Comparison of Harmonic Assessment Approaches and Implications”*  
presentado en la CIGRE Session 2018 (Trabajo C4-111)

Autores: D O Brasil, ONS, **Brazil** - C Buchhagen, TenneT, **Germany** - Z Emin, PSC UK, **United Kindom** - C F Jensen, Energinet, **Denmark** - L Soto Cano, Red Eléctrica de España, **Spain** - M Val Escudero, EirGrid, **Ireland**

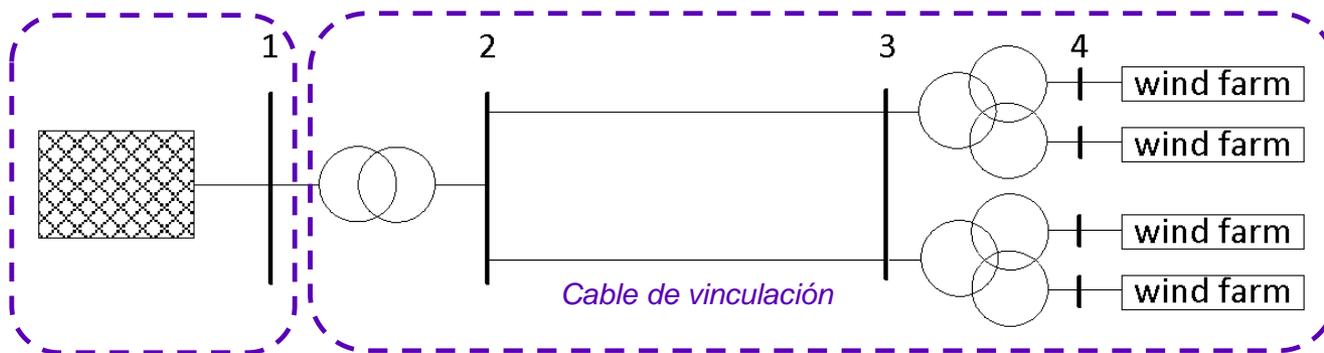
- El Trabajo describe cómo se aborda la integración de grandes Parques Eólicos al sistema de potencia, en términos de contaminación armónica, en seis países distintos (Brasil, Alemania, Reino Unido, Dinamarca, España e Irlanda).
- Describe brevemente los respectivos “Marcos Regulatorios”, haciendo especial hincapié en los roles y las responsabilidades de los distintos actores involucrados. Señala que, si bien el objetivo de todos ellos es el mismo, emplean diferentes enfoques.
- Destaca que el impacto del Parque en la red, en materia de armónicas, se manifiesta de dos maneras:
  - La modificación de la red preexistente por la instalación cables y demás componentes.
  - La emisión de armónicas propiamente dicha de los aerogeneradores.
- Propone un caso con un proyecto sencillo, en el que se integra un Parque Eólico a una red preexistente. Le aplica los enfoques de los distintos marcos regulatorios. Se analiza específicamente lo que ocurre con las armónicas 5<sup>a</sup> y 13<sup>a</sup>.

- La mayoría de los países – a excepción de Brasil – se propone como objetivo que, luego de la inserción del Parque, no se alcancen los “Niveles de Planeamiento” brindados por la Norma IEC 61000-3-6.
- Tales Niveles son los empleados internamente por los operadores de red como criterio de diseño. Son inferiores a los valores máximos permitidos.
- Se observa un importante consenso en realizar estudios previos por medio de simulaciones y, una vez que el Parque se encuentra operativo, efectuar mediciones de campo.

## Ejercicio planteado

Red preexistente

Nueva red



Contenido armónico preexistente

Factores de modificación por la nueva red en distintos nodos (sin inyección)

Debido a la inyección del Parque

<b>h</b>	<b><math>V_{bck}</math></b>	<b><math>k_1</math></b>	<b><math>k_2</math></b>	<b><math>k_3</math></b>	<b><math>k_4</math></b>	<b><math>V_{dI}</math></b>
5	1.2	2	2	2.2	2.2	1.9
13	0.5	1.1	1.1	1.18	1.18	0.4

La idea es determinar el valor resultante para cada h en el Punto de Acoplamiento y compararlo con los Niveles de Planeamiento

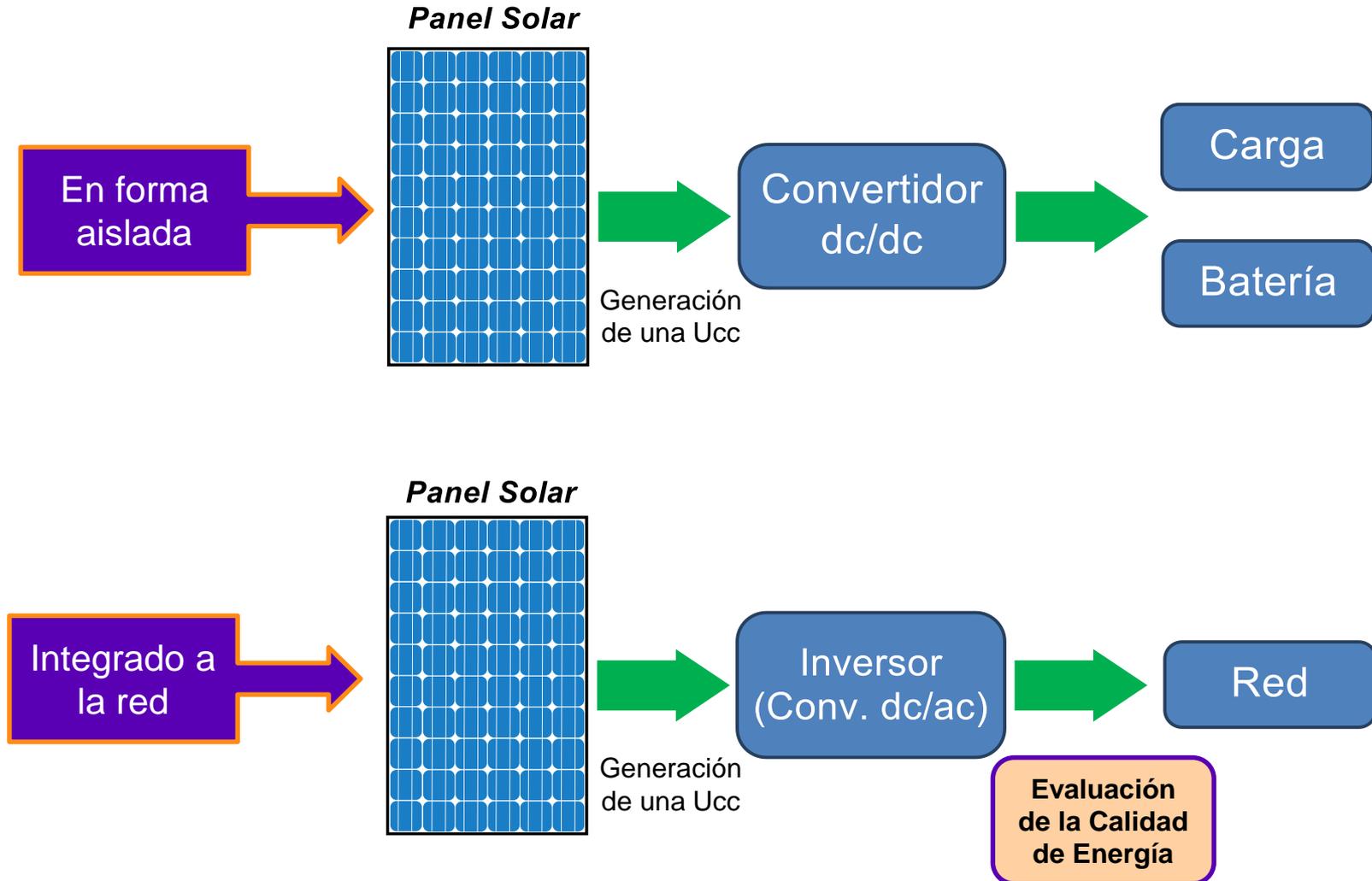
Si resulta menor  $\Rightarrow$  OK

Si resulta mayor  $\Rightarrow$  **medidas de mitigación**

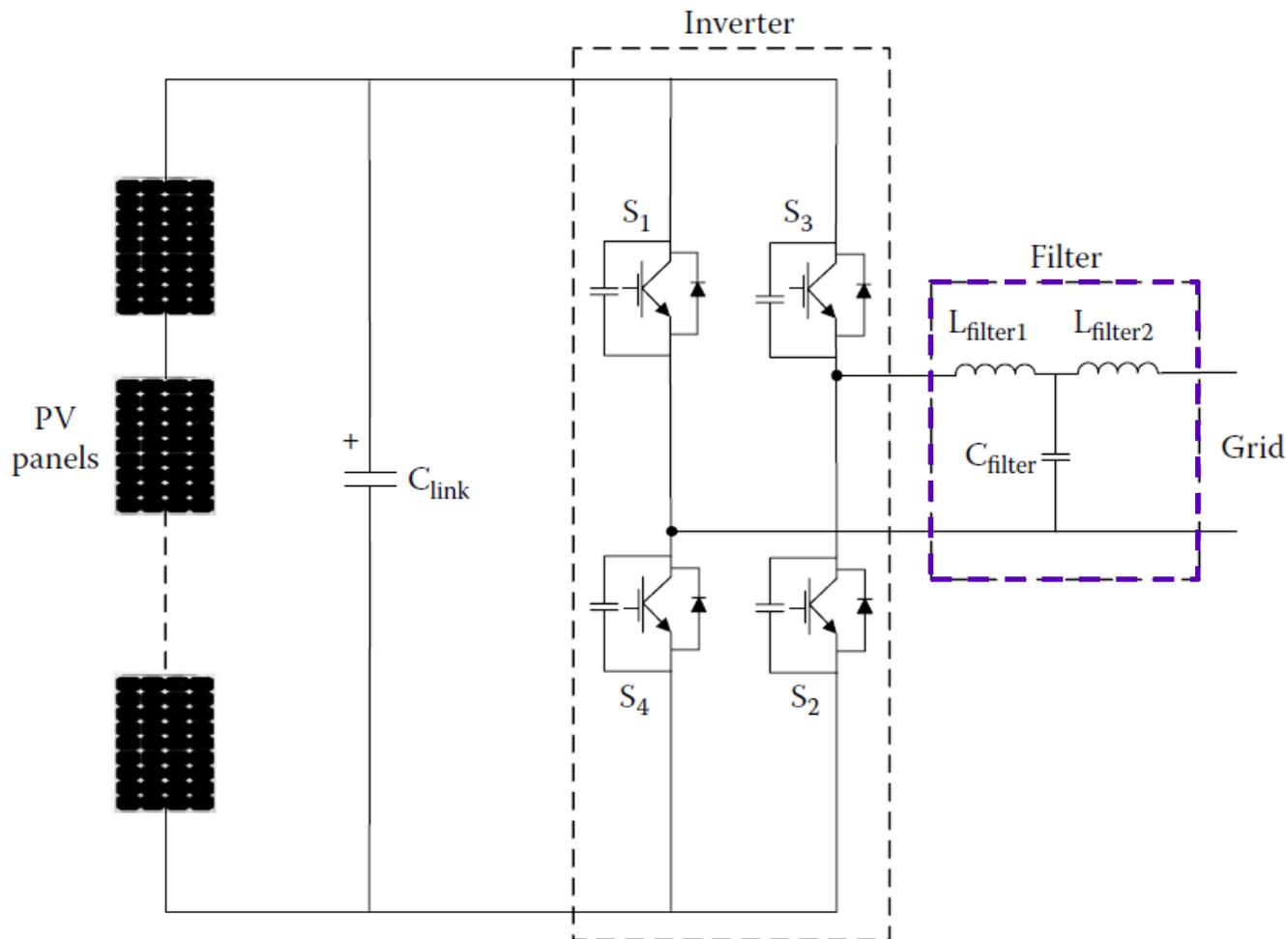
## Ejercicio planteado – Resultados

	h=5 	Mitigation Req'd? (Responsibility)	h=13 	Mitigation Req'd? (Responsibility)
Brazil	Individual Levels breached	Yes (Customer)	Compliant	No
Denmark	Planning Levels breached	Yes (TSO)	Compliant	No
Germany	Planning Levels breached	Yes (TSO)	Compliant	No
Ireland	Planning Levels breached	Yes (TSO)	Compliant	No
Spain				
United Kingdom	Planning Levels breached	Yes (Customer)	Compliant	No

- En todos los casos, no hubo problemas con la armónica 13<sup>a</sup>, pero sí con la 5<sup>a</sup>.
- Para la 5<sup>a</sup> armónica en todos los casos hubo que implementar una medida de mitigación ⇒ instalación de filtros.
- Sin embargo, dependiendo del país que se trate, es distinto el actor que debe implementarlo y absorber los costos adicionales que esto genera (Operador del Sistema de Transmisión / Parque).

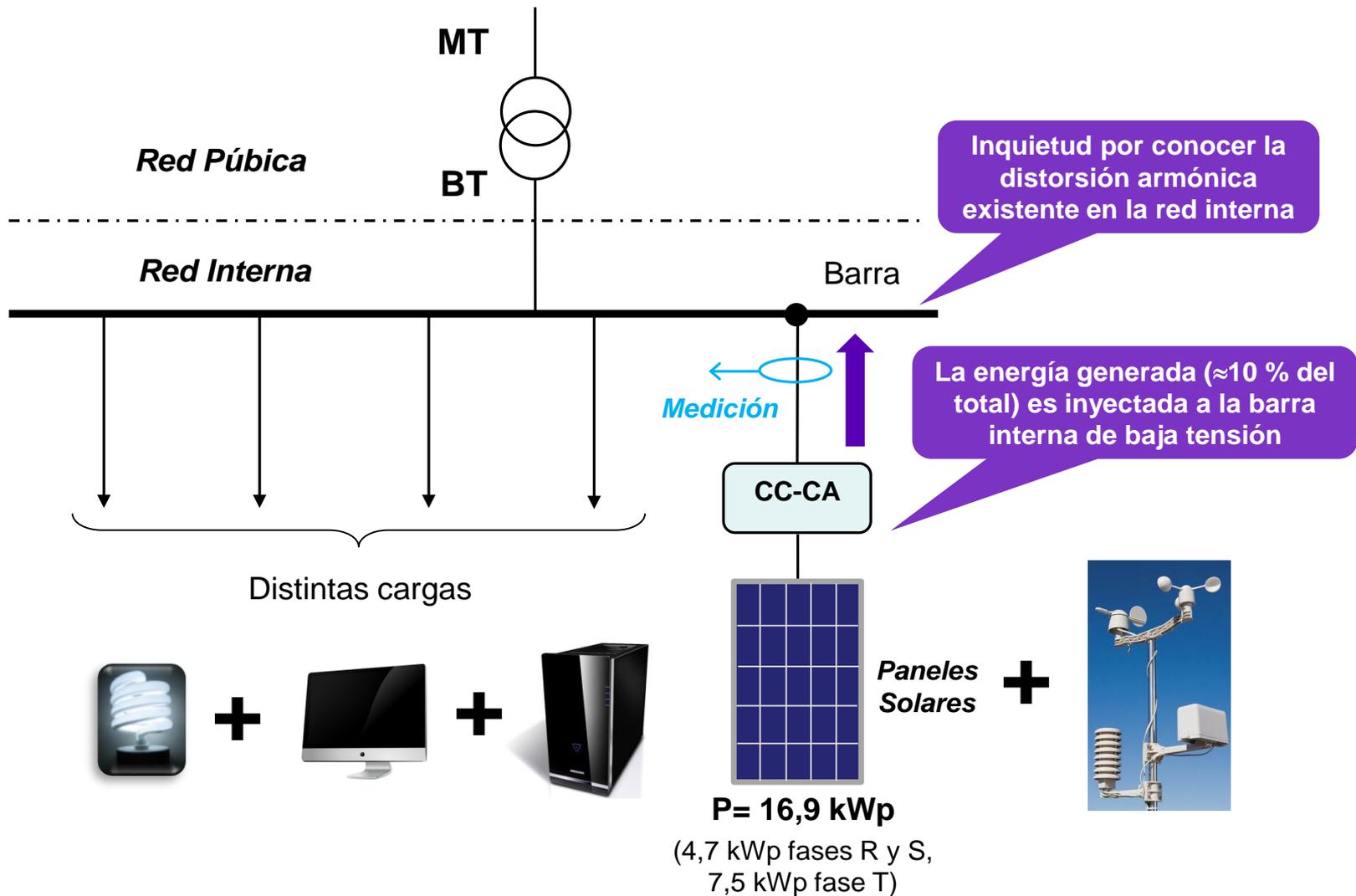


A diferencia del caso de energía eólica, no existe por el momento una Norma IEC para aplicar a los generadores fotovoltaicos. Deben emplearse simulaciones/mediciones para evaluar el impacto

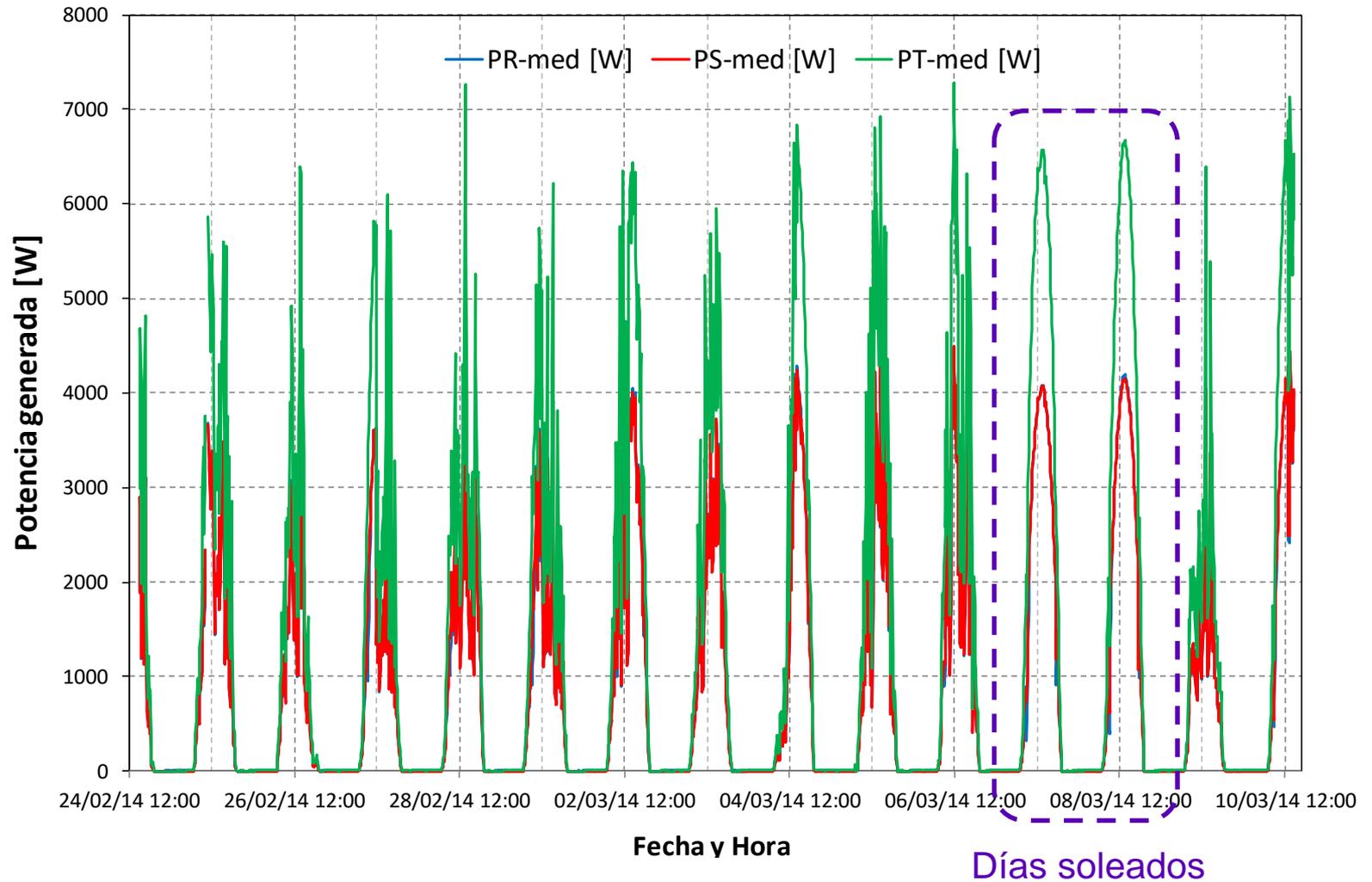


El impacto del generador FV en la Calidad de Energía depende básicamente del Inversor (incluyendo filtro de armónicas) empleado

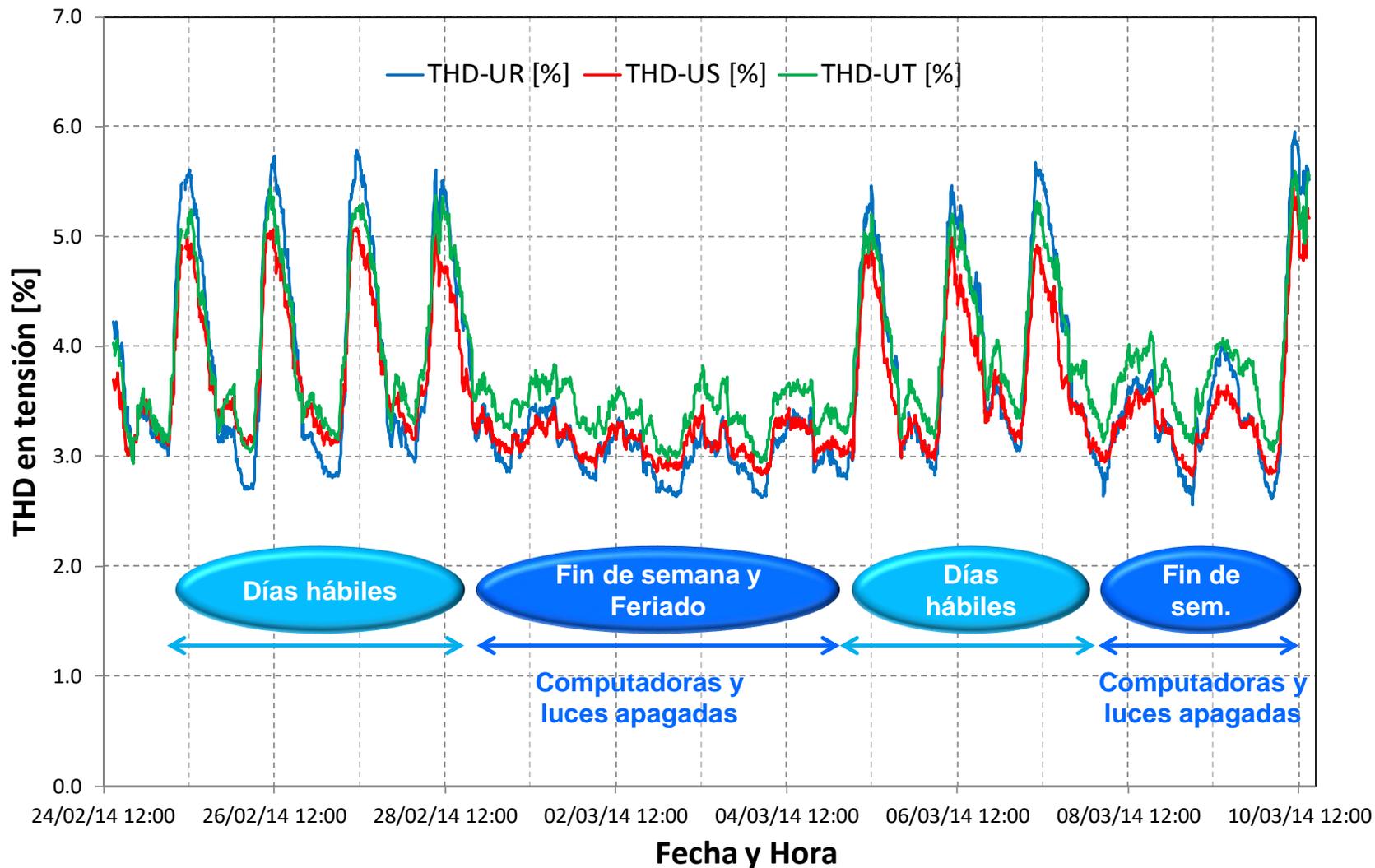
Esquema simplificado de la red (Facultad de Informática de la UNLP)

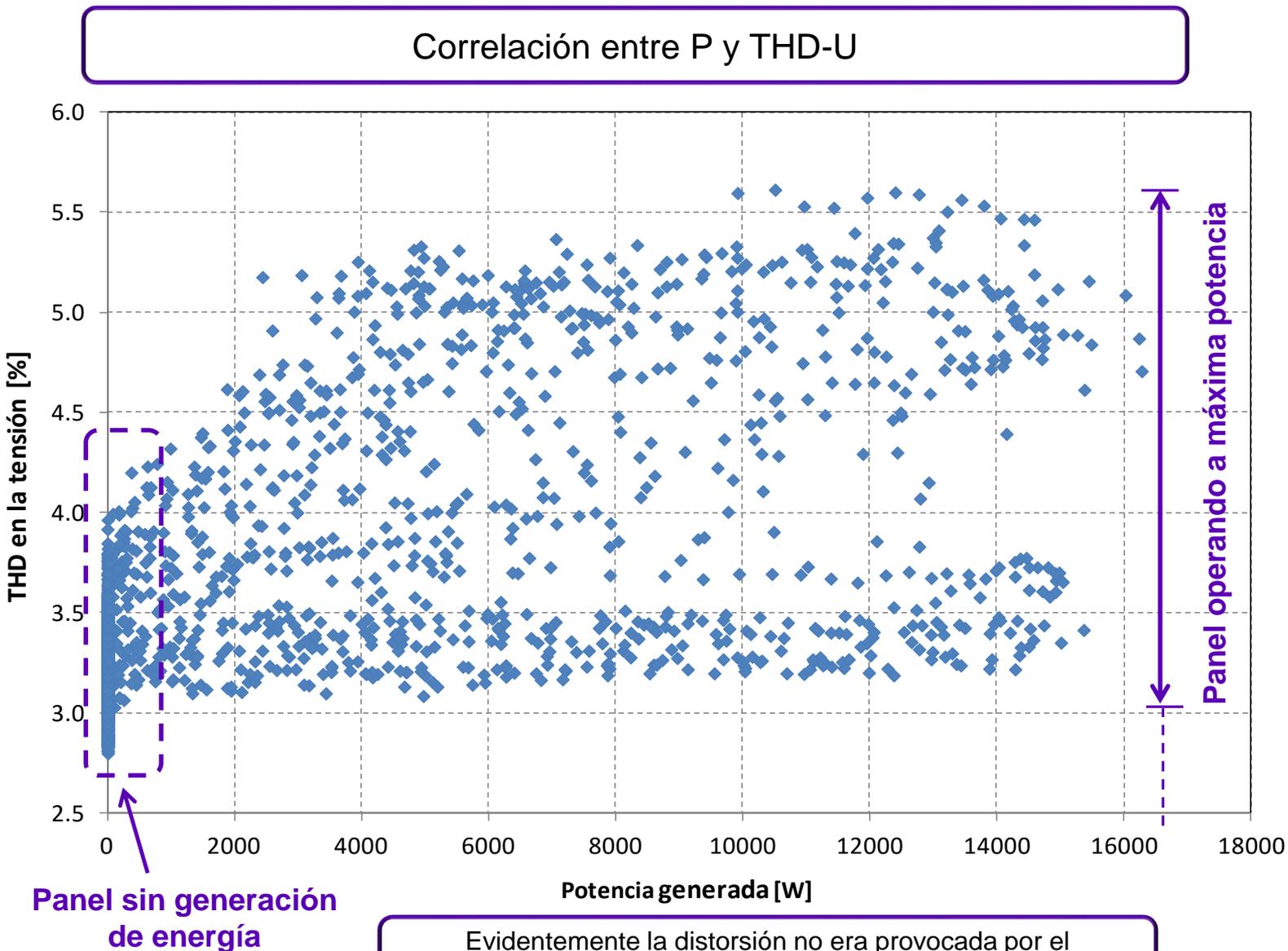


## Potencia generada e inyectada a la red interna



## Distorsión de tensión (THD-U) en la barra





Evidentemente la distorsión no era provocada por el generador, sino por las cargas y la red externa...

- ❑ Las FERNC emiten perturbaciones hacia la red a la que se encuentran conectadas.
- ❑ En ese sentido, deben ser consideradas del mismo modo que una “carga perturbadora”.
- ❑ Es por ello que tales emisiones de perturbaciones – básicamente armónicas y flicker – deben ser contempladas en los requerimientos de conexión al sistema de potencia.
- ❑ La Norma IEC 61400-21 es una buena referencia para estimar la emisión de un Parque Eólico, a partir de resultados de ensayos de un único aerogenerador.
- ❑ Sin embargo, se han observado diferencias entre dichas estimaciones y mediciones en campo (debidas principalmente a no contemplar la red interna del Parque Eólico, y la externa).
- ❑ Para subsanar tales diferencias deberían realizarse simulaciones incluyendo la red interna del Parque y externa de la empresa prestataria.
- ❑ De todos modos, dentro del paquete de ensayos para habilitar determinado Parque Eólico deberían incluirse mediciones de Calidad de Energía normalizadas (al menos una semana de duración, con equipo conforme a Norma IEC 61000-4-30, período de integración de 10'; etc).
- ❑ Se debe contar con un Marco Regulatorio – Código de Red – local, claro y preciso (en términos de responsabilidades), que incluya no sólo el procedimiento de habilitación, sino también los correspondientes límites.
- ❑ Es requisito indispensable contar con dicho Código de Red previo al ingreso de grandes Parques, ya que de lo contrario podría ser demasiado tarde...
- ❑ Se presentó parte de un Trabajo sobre cómo distintos países abordan la temática.
- ❑ Se analizaron mediciones de armónicas en un Parque Eólico y en un establecimiento en el cual se ha instalado un generador fotovoltaico.
- ❑ De ambos casos se concluye que, desde un punto de vista de la Calidad de Energía, si se toman los recaudos necesarios, resulta factible la integración de las FERNC al sistema.

A photograph of a wind farm in a green field under a clear blue sky. Several wind turbines are visible, with one prominently in the foreground on the left and others receding into the distance. The text is overlaid in the center of the image.

**¡Muchas gracias por  
su atención!**

A photograph of a large array of blue solar panels mounted on a metal frame on a rooftop. The panels are arranged in rows and are tilted towards the sun. In the background, there are trees and buildings under a clear blue sky. The text is overlaid in the center of the image.

***[gbarbera@iitree-unlp.org.ar](mailto:gbarbera@iitree-unlp.org.ar)***